



전기설비의 고조파 대책기술(상)

유 상 봉 쌍용엔지니어링(주) 부장
김 세 동 한국건설기술연구원 수석연구원

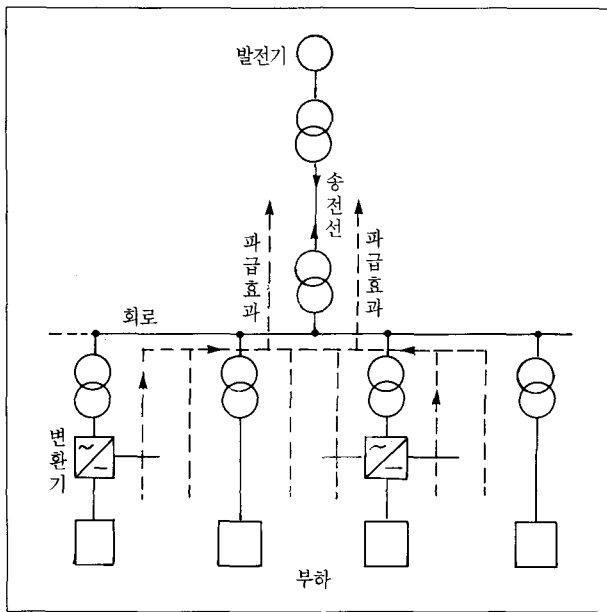


1. 고조파 발생의 기본개념

전력전자기술(Power Electronics Technology)의 발전에 따라 최근의 전기 설비에서는 FA 및 OA용 전원, 정보통신용 전원으로 무정전 전원장치가 필수적으로 시설되고 있으며, 또한省去너지를 위한 전동기 가변속 구동장치가 많이 채택되고 있다. 이러한 무정전 전원공급장치나 전동기 가변속 구동장치는 전력변환기인 인버터를 사용하게 되며, 인버터는 직류를 교류로 변환하는 장치로 그 전단에는 일반적으로 교류를 직류로 변환하는 컨버터(정류장치)가 접속되어 있다. 그런데, 이러한 컨버터는 고조파 전류의 발생원으로서 이 고조파 전류가 각 컨버터로부터 집적되어 그림 1-1에 나타낸 바와 같이 계통을 따라 전원까지 역류하고 있다.

이러한 고조파 전류는 전원으로부터 부하단까지의 임피던스에 의하여 전압강하를 일으키고, 이 전압강하에 따라 비록 전원전압파형이 순정현파라 할지라도 부하단의 전압파형은 왜형파(歪形波)가 된다. 이런 전압 찌그러짐은 각종 계전기 오

동작, 정밀 전자기기의 동작불량, 기기 손상 및 과열의 원인이 될 수 있다. 따라서 전력품질보증의 문제로서 양질의 전원 즉 주파수, 전압 등이 안정되어야 전기설비의 기능을 만족할 수 있으며, 또한 EMC의 문제로서 전자과장해 방지 측면에서도 만족하여야 한다.



〈그림 1-1〉 고조파 유출경로

2. 왜형파와 Fourier 급수

일반적으로 고주파(高周波, High Frequency)는 전력 관계에서 상용주파수보다 높은 주파수, 예를 들면 수백Hz 이상인 주파수를 말하며, 고조파(高調波, Harmonics)는 기본파에 대하여 그의 정수배의 주파수를 말하는 것으

로, 통상 왜형파는 그림 2-1과 같이 기본파와 고조파로 분해해서 생각할 수 있으며, 이것이 Fourier 급수의 개념이다.

즉, 주기적으로 반복하는 임의의 왜형파를 Sine 및 Cosine항을 갖는 기본파와 그의 충분한 수의 고조파의 합으로 표현하는 것이다.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin n \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos n \omega t$$

$$= a_0 + a_1 \sin \omega t + a_2 \sin 2 \omega t + a_3 \sin 3 \omega t + \dots$$

$$+ b_1 \cos \omega t + b_2 \cos 2 \omega t + b_3 \cos 3 \omega t + \dots$$

여기서, a_0 는 왜형파 교류의 직류분을 나타내며, $a_1 \sin \omega t$ 및 $b_1 \cos \omega t$ 항은 왜형파 $f(t)$ 의 기본이 되는 것으로 기본파라고 한다. 이러한 왜형파의 질을 나타내는 수치로는 통상종합 전압왜형률 및 고조파 함유율로 나타낼 수 있으며,

종합 전압왜형률은 기본파성분 실효치에 대한 전체 고조파 성분 실효치의 비율로

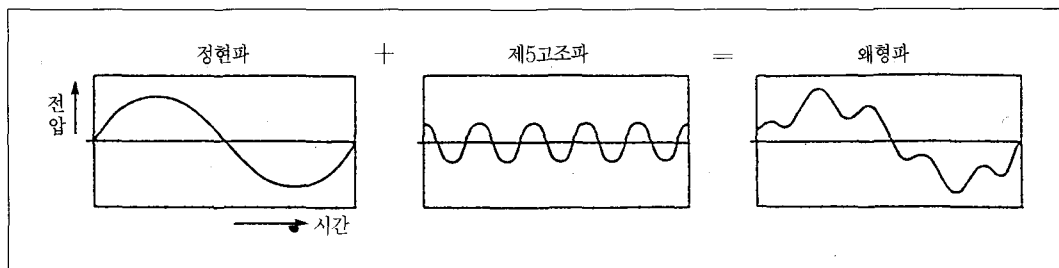
$$\frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} V_n^2}}{V_1} \times 100(\%)$$

다만, V_n : 제 n 차 고조파 전압의 실효치

V_1 : 기본파 전압의 실효치

이며, 고조파 함유율은 어떤 차수의 고조파 성분 실효치의 기본파 성분 실효치에 대한비율로

$$\frac{I_n}{I_1} \times 100(\%) \quad \text{또는} \quad \frac{V_n}{V_1} \times 100(\%)$$



〈그림 2-1〉 제5고조파를 함유한 왜형파 예

로 표시할 수 있다.

3. 전압 찌그러짐 현상

정현파 회로 전압을 찌그러뜨리는 원인은 주로 고조파를 함유한 교류회로 전류에 있다. 주파수 f_n 의 고조파 전류 I_n 에 의한 회로에는 동일 주파수의 고조파전압 U_n 가 발생한다. 즉, 순 인덕턴스 L_s 만 있는 회로를 가정하면,

$$U_n = I_n 2\pi f_n L_s$$

의 고조파가 발생하며, 상기 식으로부터 고조파전압의 실효치는 f_n 에 비례하여 증가한다. 회로 인덕턴스 L_s 대신에 단락 리액턴스 $X_s = 2\pi f L_s$ 가 주어지는 경우는

$$U_n = I_n n X_s$$

여기서, X_s : 기본주파수 f 에서의 단락 리액턴스

I_n : 제 n 차 고조파 전류

n : 고조파 차수

가 되며, 따라서 단락 리액턴스가 크면 클수록 전압 찌그러짐도 커지게 된다.

이에 대한 설명을 그림으로 나타내면 그림 3-1과 같으며, 일반적으로 상용전원, 발전기 및 송전선로 등 모

든 전력계통은 그 내부에 Impedance를 포함하고 있다. 그러나 이 Impedance는 주파수에 비례하기 때문에 60Hz 기본파 전류에 비하여 각 고조파에 대한 Impedance는 고조파수에 비례하여 증가한다. 예를 들어 제5고조파에 대한 Impedance는 기본파 성분에 대한 Impedance보다 5배 크다. Impedance는 전류의 흐름을 저해하기 때문에 전원계통 Impedance 양단에 전압을 유기시킨다.

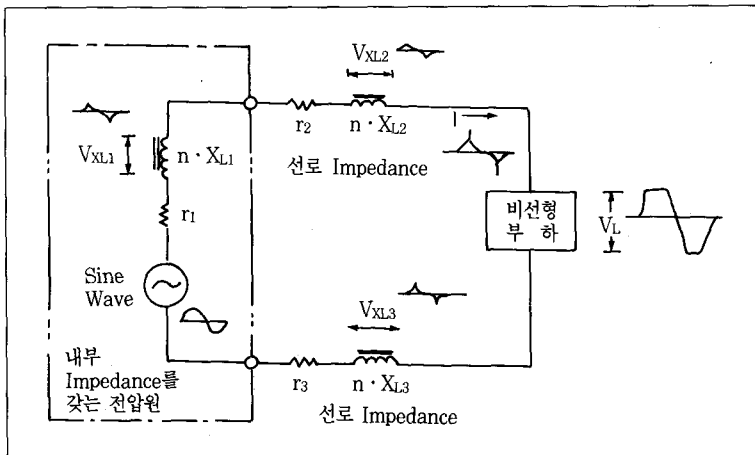
이러한 유기전압은 인가되는 전원전압과 반대방향의 크기를 가지며, 그래서 전원전압을 감소시킨다. 전원계통 Impedance가 클수록 비선형 부하인가시 전압 찌그러짐이 심해진다. 이와 같은 이유로 전원전압이 순수 정현파형에서부터 왜곡된 정현파형으로 변화하기 때문에 고조파를 함유하게 되고, 이러한 현상은 비선형부하 그 자체에도 영향을 미치지만 그것보다 더욱 심각한 것은 동일계통에 연결된 다른 기기에 영향을 끼치는 것이다.

4. 고조파 발생원

각종 전력변환 시스템은 비선형 부하이며, 여기에서 발생하는 고조파 전류는 전원계통의 전압왜곡을 일으키며, 발생원의 내부 임피던스와 전기설비의 임피던스가 공진조건을 만족하면 고조파 전류는 증폭되어 전자유도장해를 일으킨다. 고조파 전류의 발생원은 대부분

전력전자소(Power Electronics ; Diode, SCR 등)를 사용하는 기기에서 발생된다. 그 종류를 들어보면

- ① 변환장치 [인버터, 컨버터, 무정전 전원장치, 정류기, 가변전압 가변주파수 장치(VVVF) 등]
- ② 아크로, 전기로 등
- ③ 형광등
- ④ 회전기기
- ⑤ 변압기
- ⑥ 과도현상에 의한 것 등이다.



〈그림 3-1〉 전력계통의 전압찌그러짐 현상

번호	전원회로	전류파형	전류의 왜곡률(%)
1			20~40
2			40~110
3			0~110
4			약 10

〈그림 4-1〉 전원회로별 전류파형

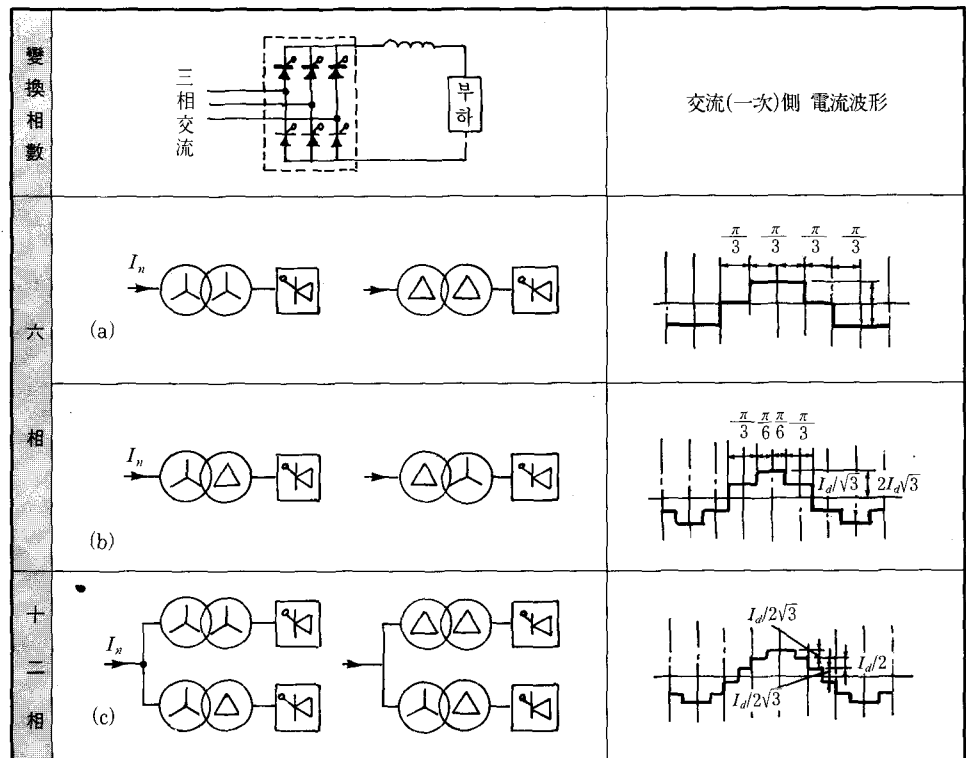
③~⑥은 발생고조파 크기가 적고 순간적인 것이 많아 크게 문제가 되지 않으나, ①~②의 고조파 발생원은 지속적이고 고조파 전류성분이 크기 때문에 다른 기기나 선로에 미치는 영향이 대단히 크다.

전원회로에 반도체 정류소자를 이용한 경우나 변압기, 형광등 등의 기기는 정현파 전압을 인가한 경우에는 실제회로에 흐르는 전류는 왜형파형이 되는 경우가 많다. 그림 4-1은 저압회로에서 사용되는 주된 고조파 발생 기기에 대하여 전원회로별로 각각의 전류파형을 표시한 것이다. 1번은 반파 정류회로서 평활용 Capacitor가

없는 경우이며 제2고조파, 제4고조파 등 우수조파 성분이 많다. 2번은 Bridge 전파 정류회로서 평활용 Capacitor가 있으며 이로 인해 전류파형은 Peak 형태로 된다. 3번은 SCR 또는 TRIAC 등의 소자를 이용하여 교류 양방향의 위상을 제어하는 형태의 전류 파형을 나타낸 것이다.

이상과 같은 부하는 그 자체의 성질상 전원에서부터 왜형파 전류를 소모하므로 계통전체에 대해서 고조파 전류원으로 동작하여 계통내를 순환하는 고조파 전류를 흘리거나 계통내의 전압 파형을 찌그러뜨려서 다른 기기에 영향을 준다. 고조파 전류가 유입하는 경우 상기와 같은 직접적인 영향 이외에도 각종 전기설비 및 기기의 온도 상승이 높아지고 절연물의 수명도 저하하게 된다.

다. 3상회로를 예를 들어 설명하면, 그림 4-2는 3상 정

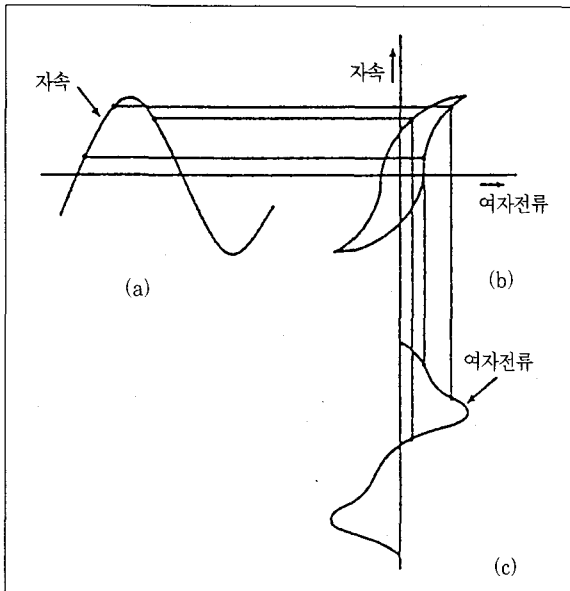


〈그림 4-2〉 3상 정류기의 교류측 전류파형

〈표 4-1〉 정격부하전류에 대한 정류기의 고조파 전류

(단위 : %)

고조파 차수	6펄스 정류기	12펄스 정류기	24펄스 정류기
5차	17.5	2.0	2.0
7차	11.0	1.5	1.5
11차	4.5	4.5	1.0
13차	3.0	3.0	0.75
17차	1.5	0.2	0.2
19차	1.25	1.15	0.15
23차	0.75	0.75	0.75
25차	0.75	0.75	0.75



〈그림 4-3〉 변압기의 히스테리시스 특성곡선

류기의 교류측 전류파형을 나타낸 것이며, 표 4-1은 3상 정류기의 고조파 성분을 분석한 결과이다. 펄스수가 높아질수록 고조파가 현저하게 줄어드는 것을 알 수 있다.

또한, 변압기의 경우 철심의 자화 특성은 그림 4-3과 같이 대칭으로 비선형의 히스테리시스 특성이 있다.

그 때문에 (a)와 같은 정현파의 자속을 만들어내는 여자전류는 (c)와 같은 홀수 고조파를 포함한 대칭 왜형파 전류가 된다. 또한, 여자전류는 이 홀수 고조파 중에서도 저차(低次)의 제3고조파 성분의 비율이 크다. 정현파의 전압을 유기하기 위해서는 자속이 정현파가 될 필요가 있으므로 (c)와 같은 제3고조파를 포함한 여자전류가 필요해진다.

5. 직렬 및 병렬공진

가. 공진주파수

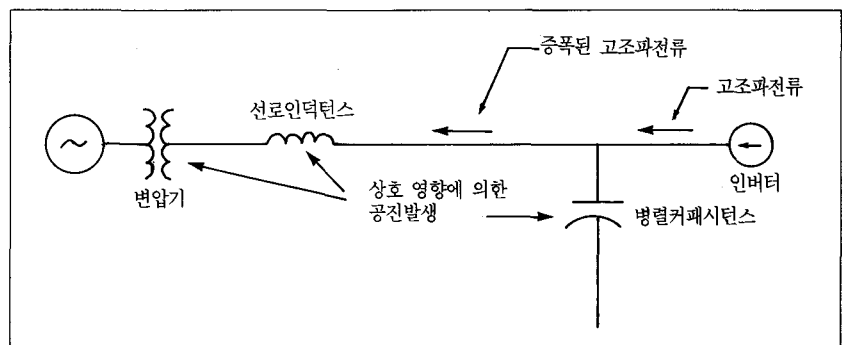
고조파 발생원에서 발생한 고조파 전류는 선로의 용량성 및 유도성 임피던스로 인하여 어떤 경우 공진현상이 발생하게 되는데, 공진현상이 발생하면 고조파 전류는 증폭되며 진상콘덴서, 변압기, 발전기, 전동기, 각종 조명설비에는 과대한 전류가 흘러 기기의 과열, 소손이 발생할 우려가 있다. 그림 5-1은 공진현상을 일으키는 배전계통을 나타낸 것이다.

공진주파수 f_r 은 단락회로의 인덕턴스를 L_N 이라고 하면(단락 리액턴스 $X_N=2\pi f_N L_N$)

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_N C}}$$

여기서 배전전압을 V 라고 하면 단락용량 S_N 은

$$S_N = \frac{V^2}{2\pi f_N L_N}$$



〈그림 5-1〉 공진현상의 발생

선로에 접속된 진상 콘덴서 용량

$$Q_C = 2\pi f_N C V^2 \text{이므로}$$

$$\frac{S_N}{Q_C} = \frac{1}{2\pi f_N L_N \cdot 2\pi f_N C}$$

$$f_r = f_N \sqrt{\frac{S_N}{Q_C}}$$

또한, 여기서 부하측의 변압기용량을 S_T 라 하고 퍼센트 임피던스를 %Z라 하면, 공진 주파수는

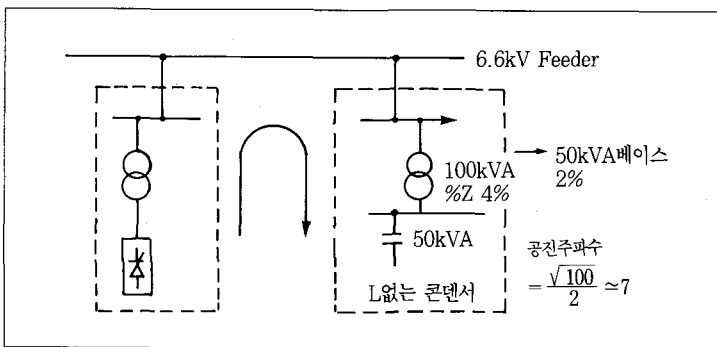
$$f_r = f_N \sqrt{\frac{100S_T}{Q_C \%Z}}$$

로 구할 수 있다.

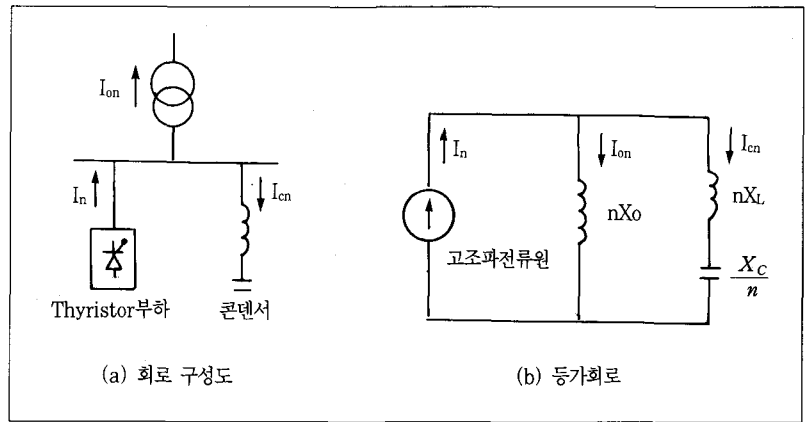
나. 직렬공진

그림 5-2의 경우 저압콘덴서와 변압기는 고압모선에 대하여 제7고조파 필터를 구성하게 되며 동일 Feeder에 접속된 타 수용가의 제7고조파 전류가 과대하게 유입되어 저압콘덴서나 변압기가 과부하로 된다.

이런 경우 고압모선에 제7고조파 전압은 없어지는데 저압모선(저압 콘덴서의 단자저압)의 제7고조파에 의한 전압왜곡은 확대되어 커진다. 직렬공진은 결국 Filter회로를 구성하게 되며, 이것이 문제가 되는 것은 이같은 Filter 작용을 의도하지 않고 구성된 전력계통에 결과적으로 이상과 같은 직렬 공진현상이 일어났을 경우이다.



〈그림 5-2〉 직렬공진에 의한 장애 예



〈그림 5-3〉 고조파 전류의 분류

다. 고조파 전류의 확대 및 병렬공진

그림 5-3에서 고조파 발생원에서 발생하는 제 n 차 고조파 전류를 I_n , 전원의 기본파 리액턴스를 X_o , 콘덴서의 기본파 리액턴스를 X_c 라 하면, 전원측과 콘덴서에 흐르는 고조파 전류는

$$\text{○ 전원측 : } I_{on} = \frac{nX_L \frac{X_c}{n}}{nX_o + (nX_L - \frac{X_c}{n})} \cdot I_n$$

$$\text{○ 콘덴서측 : } I_{cn} = \frac{nX_o}{nX_o + (nX_L - \frac{X_c}{n})} \cdot I_n$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서,

1) $nX_o - \frac{X_c}{n} \ll 0$ 의 경우 :

$nX_o + (nX_L - \frac{X_c}{n})$ 는 음이 되어 이 전류가 전원계통에 유입,

$I_{on} > I_n$ 이 되어 고조파 전류의 확대를 일으킨다.

2) $nX_o + (nX_L - \frac{X_c}{n}) = 0$ 의 경우 :

병렬공진에 즈음해서 고조파 전류의 이상 확대를 일으켜 전압과형도 현저하게 일그러

지며, 여러 가지 장애를 일으킨다.

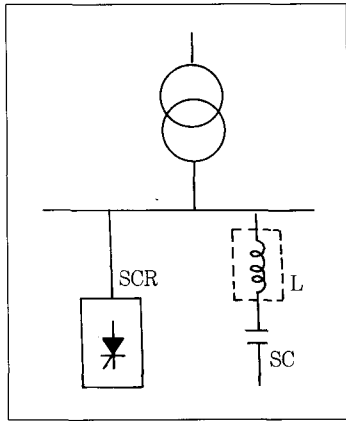
이러한 고조파 전류에 의한 Trouble발생 사례를 몇 가지 들어보면 다음과 같다.

[사례 1]

진상 콘덴서에 직렬리액터가 없는 경우 콘덴서로부터 이상음이 발생(사례 1 참조) :

→제11차 고조파의 함유 때문에 공진 현상이 발생하고 고조파 전류가 증가한 것임.

· 콘덴서에 직렬리액터를 추가시켜서 해결함.



<사례 1>

[사례 2]

6% 직렬리액터가 달린 진상 콘덴서를 증설하였을 때 리액터에서 이상음이 나고 콘덴서 과전류 릴레이가 동작 :

→사이리스터 장치에 의한 제3고조파 전류가 공진하여 확대된 것으로서 리액터를 13%로 변경, 공진점을 비켜 해결함.

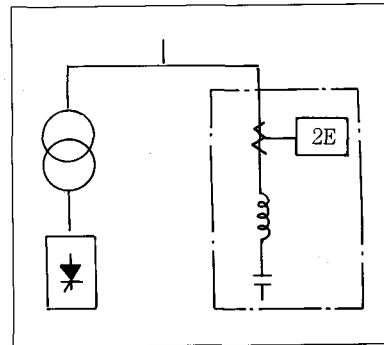
[사례 3]

공진현상에 의한 과전압으로 사이리스터 소자가 파손 :
→사이리스터 레오너드는 속도를 저하시킨 경우에 제어 각 α의 변화에 따라 역률이 나빠진다. 이 역률개선을 시도하기 위해 사이리스터 장치에 병렬로 삽입한 콘덴서와의 공진 때문에 과전압이 되어 소자가 파손됨.
· 전원계통을 충분히 검토하고 콘덴서, 리액터를 선정해야 함.

[사례 4]

사이리스터 장치의 계통에 추가한 진상 콘덴서회로의 보호용 2E 릴레이의 오동작(사례 4 참조) :

→고조파 전류에 기인한 것으로 최근의 2E 릴레이 등은 파형 변형에 대해서는 개선되고 있지만 콘덴서 회로의 경우 선정에 주의가 필요함.



<사례 4>

6. 고조파 영향

고조파 전류의 증대는 진상 콘덴서 등에 장애를 야기시킬 뿐만 아니라 다음과 같이 여러 가지 기기에 나쁜 영향을 미친다.

- ① 콘덴서, 직렬리액터의 과열·과전압 발생
- ② 발전기나 회전기, 변압기의 손실 증대로 인한 과열

$$I = I_1 \sqrt{1 + \sum \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}$$

$$W = W_1 \left[1 + \sum n^a \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2\right] \quad (\text{단}, 1 < a < 2)$$

- ③ 이상 공진에 의한 고조파 과전압의 기기에의 영향
- ④ 보호계전기의 오동작이나 기기류의 오차(특히 정지형 보호계전기)
- ⑤ 지시계기, 적산계기의 오차
- ⑥ 사이리스터 장치에의 제어 불안정
- ⑦ 통신회로에의 잡음 및 유도장해

참고로 일본의 배전계통에 있어서 고조파 장애의 조

사결과와 예를 표 6-1에 표시하였다. 이 표를 보면 전력용 콘덴서 등에서의 영향이 가장 큰 것으로 나와 있으며, 이것은 콘덴서가 고조파 전류의 흡수역할을 한다는 것을 나타낸다. 표 6-2에는 고조파가 각종 전기기기에 미치는 영향의 내용에 대해 나타나 있으며 다음과 같이 크게 5가지 형태로 영향을 주는 것으로 생각된다.

- ㉑ 위상 제어기기의 순시 위상에서의 영향
- ㉒ 전원 전압파형의 왜곡화
- ㉓ 고조파 전류의 차수에 의한 영향
- ㉔ 고조파 전류의 파형왜곡 및 역상 및 영상성분에 의한 영향

〈표 6-1〉 고조파 장애의 예

영향을 받는 기기		건수(A)	건수(B)	
조상용기기	전력용콘덴서	리액터부	11(24)	1(2)
		리액터 없음	7(16)	29(71)
	콘덴서용 리액터	14(31)	4(10)	
	소 계	32(71)	34(83)	
가타설비	과전류 계전기	3(7)	1(2)	
	라디오·텔레비전 무선	3(7)		
	X선 마이크로 애널라이저	1(2)		
	전력용 퓨즈	2(5)		
	저주파 유도로	1(2)		
	전동기	1(2)		
	적산전력계	1(2)		
	포켓벨	1(2)		
	변압기		4(10)	
	배전용 차단기		1(2)	
	소 계	13(29)	7(17)	
합 계	45(100)	41(100)		

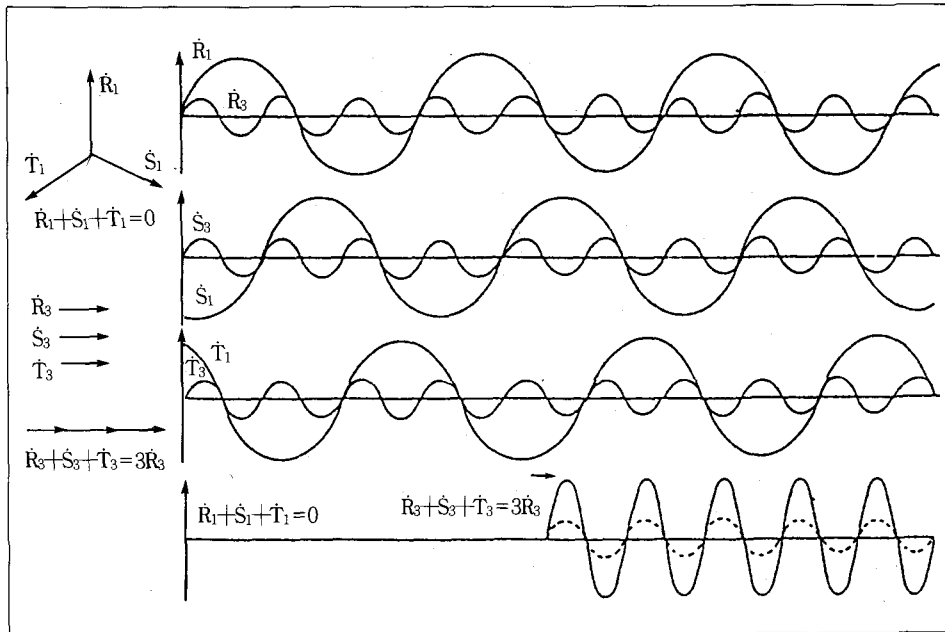
- (주) 1. 건수(A)는 전기학회 배전장치 전문위원회의 조사결과이고, 건수(B)는 전기협동연구회 배전선 고조파대책 전문위원회의 조사결과임.
 2. 영향을 받는 기기가 2종류 이상 있을 경우는 각각 1건으로 계산
 3. 배전계통이 아닌 것은 제외
 4. ()내는 전체에 접하는 점유율(%)임.

〈표 6-2〉 고조파가 기기에 미치는 영향

기기명	영향의 내용
콘덴서 및 직렬 리액터	고조파 전류에 대한 회로의 임피던스가 감소하여 과대전류가 유입함에 따른 과열, 소손 또는 진동, 소음의 발생
케이블	3상 4선식 회로의 중성선에 고조파 전류가 흐름에 따라 중성선의 과열
변압기	· 고조파 전류에 의한 철심의 자화현상에 의한 소음의 발생 · 고조파 전류·전압에 의한 철손·동손의 증가와 함께 용량의 감소
형광등	· 고조파 전류에 대한 임피던스가 감소하여 과대전류가 역률개선용 콘덴서나 초크코일 흐름에 따른 과열·소손
통신선	· 전자유도에 의한 잡음전압의 발생
유도 전동기	· 고조파 전류에 의한 정상 진동토크 발생에 의하여 회전수의 주기적 변동 · 철손·동손 등의 손실증가
음향기기 (텔레비전 등의 각종 제어장치)	· 고조파 전류·전압에 의한 다이오드·트랜지스터·콘덴서등의 고장, 수명의 저하, 성능의 열화 · 잡음, 영상의 어긋거림
정류기 등의 각종 제어장치	제어신호의 위상의 착오에 의한 오제어
부하집중 제어장치	제어신호의 혼란에 의한 수신기의 오동작·오부동작
계전기	고조파 전류 혹은 전압에 의한 설정레벨의 초과 혹은 위상변화에 의한 오동작·오부동작
전력용 퓨즈	과대한 고조파 전류에 의한 용단
노류즈 브레이크	과대한 고조파 전류에 의한 오동작

㉕ 잡음 및 유도장애에 의한 영향

또한 중성선에서의 제5고조파 전류 흐름이 확대된 경우를 설명하면 그림 6-1과 같다. 예를 들어 3상 전원의 각상에 1상 SMPS 등 제3고조파 발생원 부하가 다수 연결되어 있는 경우 아주 흥미있는 현상이 발생한다. 즉, 3상평형이 맞았음에도 불구하고 중성선에 상전류보다 큰 전류흐름이 종종 관측된다. 이것은 3상의 경우 각상의 위상차는 120°이기 때문에 각상의 전류에 포함되어 있는 3배수 고조파 전류(3고조파, 9고조파, 15고조파 ... 등)가 중성선에서 서로 상쇄되지 않고 합쳐지



〈그림 6-1〉 중성선의 3고조파 전류 확대현상

기 때문이다.

이것을 수식으로 설명하면 다음과 같다.

3상교류의 기본파는 상호 120°의 위상차를 가지고 있지만, 제3고조파는 기본파의 3배의 주파수를 가지고 있으므로 각 상에 흐르는 제3고조파 전류의 위상차는 120°×3=360°가 되어 동위상이 된다. 각 상의 전류에 위상차가 있는 경우 각 상의 기본파는

$$I_{R1} = I_m \sin \omega t$$

$$I_{S1} = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$I_{T1} = I_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

로 표시되며, 전류의 합은

$$\begin{aligned} I_{R1} + I_{S1} + I_{T1} \\ = I_m \sin \omega t + I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ + I_m \sin(\omega t - 240^\circ) = 0 \end{aligned}$$

이 되고, 동위상인 제3고조파 전류는

$$I_{R3} = I_m \sin 3\omega t$$

$$I_{S3} = I_m \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_m \sin 3\omega t$$

$$I_{T3} = I_m \sin 3(\omega t - 240^\circ) = I_m \sin 3\omega t$$

로 표시되며, 전류의 합은

$$\begin{aligned} I_{R3} + I_{S3} + I_{T3} &= I_m \sin 3\omega t + I_m \sin 3\omega t + I_m \sin 3\omega t \\ &= 3I_m \sin 3\omega t \end{aligned}$$

가 된다. 따라서 제3고조파 전류의 합은 0이 되지 않고 3I_msin3ωt가 남게 된다. 이러한 중성선에 흐르는 3배수 조파의 고조파 전류들로 인해 분전반과 배전선로에 실제로 문제가 발생한 예가 많이 있다. 예를 들어 각상 전류에 기본파의 1/√3 (약 57%)의 크기를 갖는 3고조파 전류가 포함된 경우 중성선에 흐르는 고조파 전류는 상전류의 √3배(3×1/√3=√3)의 크기를 갖으며 180Hz(60Hz×3)의 주파수를 갖기 때문에 표피효과에 의해 전선의 유효 단면적을 감소시켜 중성선의 발열을 초래하는 경우도 있다.

(다음호에 계속)